

УДК 621.9.029.001.57

А.А. Верещака, канд.техн. наук, А.С. Верещака, д-р техн. наук, Москва, Россия,  
А.Д. Батако, канд. техн. наук, Ливерпуль, Великобритания,  
О.Х. Хожаев, канд.техн. наук, Ургенч, Узбекистан

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНО КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ БЕЗВОЛЬФРАМОВЫХ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ С РАСШИРЕННОЙ ОБЛАСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

*У роботі розглянуті аспекти розробки наноструктурованих багатошарово композиційних покриттів (НБКП) для нанесення на безвольфрамові тверді сплави (БВТС) на основі систем TiC-(Ni, Mo) і TiCN- (Ni, Mo) з метою підвищення різальних властивостей інструменту з БВТС та розширення області їх технологічного застосування. Розроблена трьохкомпонентна архітектура наноструктурованих багатошарово-композиційних покриттів, методика вибору функцій і раціональних компонентних параметрів архітектури для інструментів з БВТС. Розроблені композиції НБКП дозволили підвищити різальні властивості інструменту з БВТС і розширити область їх технологічного застосування при різанні термооброблених сталей підвищеної твердості, обробці жароміцних сплавів.*

*Рассмотрены аспекты разработки наноструктурированных многослойно композиционных покрытий (НМКП), формируемых при использовании процессов фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) для нанесения на безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС) на основе систем TiC-(Ni,Mo) и TiCN-(Ni,Mo) с целью повышения режущих свойств инструмента из БВТС и расширения области их технологического применения. НМКП использовали не только для повышения физико-механические свойства рабочих поверхностей инструмента из БВТС, но и направленного управления контактными процессами при резании. Показано, что БВТС, несмотря на высокую твердость, термостабильность и окислительность, низкую склонность к диффузии с обрабатываемым материалом, обладает относительно невысокой вязкостью разрушения и прочностью при изгибе, а также низким коэффициентом теплопроводности, уступая по этим свойствам не только вольфрамодержащим сплавам WC-Co, но и сплавам WC-TiC-Co с содержанием связки менее 8% (вес). Поэтому инструменты из БВТС имеют ограниченную область технологического применения при прерывистом резании, обработке жаропрочных сплавов и сталей. В этой связи рассмотрена возможность направленного управления контактными процессами при резании с помощью НМКП с целью создания более сбалансированных свойств БВТС по твердости и вязкости. Разработана трехкомпонентная архитектура наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий, методика выбора функций и рациональных компонентных параметров архитектуры для инструментов из БВТС. Разработанные составы НМКП позволили повысить режущие свойства инструмента из БВТС и расширить область их технологического применения при резании термообработанных сталей повышенной твердости, обработке жаропрочных сплавов.*

*Aspects of the development of nanostructured multilayer composite coatings (NMCC) in order to coat the tungstenfree hard alloys (TFHA) on the basis of the systems TiC- (Ni, Mo) and TiCN- (Ni, Mo) with the aim to improve properties of cutting tools made of TFHA and expansion of the field of their technological application are discussed in the paper. Three-component architecture of NMCC, the method of choice of functions and rational component parameters of the architecture for tools made of TFHA are developed. Developed composition of NMCC make it possible to increase cutting properties of tool made of TFHA and to expand the field of their technological applications when cutting heat-treated steels with high hardness and processing heat-resistant alloys.*

© А.А. Верещака, А.С. Верещака, А.Д. Батако, О.Х. Хожаев, 2015

## **1. Введение**

Основным инструментальным материалом, используемым в современных металлообрабатывающих производствах, является твёрдый сплав. Следует отметить, что широкое применение стандартных твёрдых сплавов, содержащих дефицитные и дорогостоящие элементы типа W, Ta, Nb, Co и др., существенно увеличивает производственные расходы, что стимулировало появление ещё одной группы твёрдых сплавов, не содержащих указанные элементы и получивших наименование «безвольфрамовые твердые сплавы» (БВТС или керметы). Однако по своим свойствам и областям технологического применения БВТС существенно уступают соответствующим свойствам вольфрамосодержащих сплавов. В этой связи совершенствование свойств безвольфрамовых твёрдых сплавов и расширение области их технологического применения является важной научно-практической задачей современных металлообрабатывающих производств. По оценкам ведущих экспертов широкое применение инструмента из БВТС, не содержащего в своём составе дефицитных компонентов типа W, Ta, Nb, Co и др., в технологиях лезвийной формообразующей обработки будущего приведёт к значительным экономическим и экологическим эффектам [1-3]. Имеется ряд исследований, показывающих эффективность использования износостойких покрытий на инструментах из БВТС [4-11]. В частности, исследовалась эффективность покрытий, осаждённых методом PVD – TiAlN [4], TiN, TiC, TiCN и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6], также исследовались различные механические и эксплуатационные свойства покрытия TiN, осаждённого методом PACVD [6]. Исследования проводились с целью определения адгезии покрытия, остаточных напряжений и стойкости. Испытания, проведённые для торцевого фрезерования, показали существенное увеличение износостойкости инструмента из БВТС с осаждённым покрытием [6].

Кроме этого, бинарные и тройные покрытия на основе титана, нанесённые на различные субстраты из БВТС методом PVD, испытывались при прерывистом резании закалённых, цементированных и аустенитных сталей. Покрытия (Ti,Zr)N и Ti(C,N), нанесённые методом PVD, существенно повышают стойкость инструмента из БВТС [8]. Данное исследование также показало, что теплопроводность БВТС имеет большое значение, особенно при прерывистом резании.

Исследовались также покрытия TiN – монослойные, а также – градиентные (Ti, Al, Si)N - TiN и TiN с многослойной композицией (Ti, Al, Si)N + TiN, осаждённые методом CAE (вариант метода PVD) [9].

Результаты непрерывного точения стали С45Е показали значительное повышение стойкости пластин из БВТС с покрытием по сравнению с непокрытыми. Последние исследования указывают на возможность использования БВТС наравне с традиционными вольфрамосодержащими

твёрдыми сплавами, а в некоторых случаях – наблюдается даже превосходство БВТС над сплавами с карбидом вольфрама. В частности, в работе [10] показано, что инструмент из БВТС на основе Ti (C, N) при черновом точении может иметь более высокую стойкость и более низкий износ по передней поверхности, чем инструмент из традиционного твёрдого сплава на основе WC-Co с покрытием.

В работе [11] исследовались покрытия Ti-TiN-(TiAlCr)N, Ti-TiN-(TiZrCr)N и Ti-TiN, позволяющие повысить стойкость инструмента из БВТС в 2.5-4 раза, и в 3-4 раза, соответственно, по отношению к инструменту без покрытия и с коммерческими покрытиями.

Настоящие исследования посвящены разработке методики нанесения покрытий на инструменты из БВТС с целью повышения их режущих свойств и расширения области технологического применения. Для нанесения покрытий на субстраты из БВТС использовали инновационные процессы фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО), позволяющие формировать покрытия многослойно-композиционного типа с наноразмерной структурой. Применение покрытий такого типа позволяет не только повысить сопротивляемость инструмента из БВТС изнашиванию при воздействию высоких термомеханических напряжений, характерных для высокоскоростных процессов сухого резания, но и значительно расширить область применения инструмента, а также улучшить экологические показатели обработки. Разработка инструмента из БВТС с наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями (НМКП) является актуальным научным направлением «инжиниринга» композиционных материалов с оптимальным сочетанием поверхностных и «объёмных» свойств в едином геометрическом теле изделия. Следует отметить, что, несмотря на достаточно большой объем поисковых исследований по разработке БВТС в ряде технологически развитых стран, разработка композиционных материалов на основе слоистого композита, включающего субстрат из БВТС и НМКП практически не использовался.

## **2. Методика исследований**

Объектом исследований служили сменные многогранные пластины (СМП), в которых рационально сочетали свойства БВТС (достаточная прочность и вязкость), и многокомпонентное функциональное покрытие с многослойно-композиционной архитектурой и наноструктурой (благоприятная трансформация контактных процессов при резании, «залечивание» поверхностных дефектов) [1, 12].

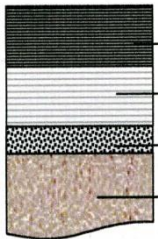
В экспериментах использовали достаточно прочные субстраты из БВТС на основе систем TiC-Ni/Mo и TiCN-Ni/Mo с содержанием связки Ni/Mo свыше 10% (объем), что позволяло придать композиту «БВТС – НМКП» прочностные свойства, близкие к соответствующим показателям достаточно

прочных марок твёрдых сплавов ( $\sigma_{\text{н}} \cong 1350 - 1400$  МПа). Формирование поверхностных слоёв в виде НМКП на основе наноструктурированной композиционно-многослойной архитектуры позволило существенно повысить износостойкость и эксплуатационную надёжность инструмента из БВТС в целом. Кроме того, комбинированное воздействие на поверхность БВТС среднеэнергетическими ионами металло-газовой плазмы с последующим синтезом ионно-плазменных НМКП на основе композиций различных соединений тугоплавких переходных металлов позволяло «залечивать» наиболее опасные поверхностные дефекты субстрата из БВТС, формируемые в процессе его изготовления (субмикротрещины, несплошности, субмикро- и микропоры, поверхностные области с растягивающими остаточными напряжениями и т.д.). Формирование НМКП на субстратах из БВТС производили при использовании стандартных физических процессов arc-PVD или MeVVA (Metal Vapor Vacuum Arc), а также инновационной разновидности процессов arc-PVD, которые получила наименование «фильтруемое катодно-вакуумно-дуговое осаждение» (ФКВДО) покрытий [10-15]. Процессы ФКВДО реализовывали на вакуумно-дуговой установке ВИТ-2.

В настоящее время процессы **MeVVA-КИБ** широко используются ведущими производителями режущего инструмента из-за высокой надёжности, универсальности, возможности получения покрытий практически любой архитектуры, состава, структуры с обеспечением экологической чистоты процессов в сравнении с методами и процессами химического осаждения покрытий (методы CVD).

При анализе функциональной роли покрытия на контактных площадках режущего инструмента из БВТС использовали концептуальное положение о двойственной природе покрытия, как некоторой «промежуточной технологической среды» (ПТС) между инструментальным и обрабатываемым материалами. Принятое положение предопределяет роль покрытия на рабочих поверхностях инструмента из БВТС. Покрытие, с одной стороны, должно направленно улучшить такие важные свойства инструментального материала, как физико-химическая инертность (склонность к адгезии) по отношению к обрабатываемому материалу, износостойкость (твёрдость, теплопроводность, теплоустойчивость и др.), с другой – должно благоприятно влиять на контактные процессы (длину контакта «стружка – БВТС, контактные напряжения, тепловые поля и т.д.) и параметры резания, определяющие интенсивность изнашивания режущего инструмента. В этом случае покрытие должно иметь многослойную архитектуру для полного соответствия требованиям как ПТС. На основе роли покрытия, как ПТС, была сформулирована концепция трехкомпонентного покрытия с наноструктурированной многослойно-композиционной структурой (НМКП) для осаждения на режущие инструменты из БВТС (табл. 1).

Таблица 1 – Архитектура НМКП для режущего инструмента из БВТС

Архитектура слоёв НМКП	Составы слоёв НМКП	Функциональное назначение
	<p>1 – наружный слой с наноразмерными субслоями (пример: Ti, AlN, (TiCrAl)N, (ZrCrAl)N, (TiCrAlSi)N и др.)</p> <p>2 – промежуточный слой с наноразмерными субслоями (пример: TiN, TiN/AlN, ZrN, CrN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.)</p> <p>3 – адгезионный подслои (пример: Ti, Zr, Cr, TiN, CrN и др.)</p> <p>4 – субстрат из БВТС (КНТ-16)</p>	<p>1. Повышение износостойкости субстрата из БВТС, снижение физико-химической и адгезионной активности БВТС, управление контактными процессами.</p> <p>2. Обеспечение адгезии между слоями 1 и 3, барьерные функции (относительно диффузии, тепловых потоков и др.).</p> <p>3. Обеспечение высокой адгезионной прочности между слоем 3 и субстратом (слой 4).</p>

Выбор химического состава износостойкого слоя НМКП производили исходя из принятого допущения о том, что основным механизмом изнашивания режущего инструмента из БВТС является адгезионно-усталостное изнашивание. Исходя из принятой модели изнашивания инструмента из БВТС, максимальное снижение адгезионно-усталостного изнашивания режущего инструмента обеспечивается при минимуме теряемой массы материала инструмента, т.е. при  $Ma \rightarrow \min$  [1]:

$$Ma = K_a \cdot \rho \cdot F_a (J \cdot \sigma_a / \sigma_p), \quad (1)$$

где  $K_a$  – коэффициент адгезии (объёмный);

$\rho$  – плотность инструментального материала;

$F_a$  – номинальная площадь контакта;

$J$  – интенсивность адгезии;

$\sigma_a$  – прочность связей в узлах адгезии;

$\sigma_p$  – сопротивляемость инструментального материала разрушению.

В частности, интенсивность адгезии определяли следующей зависимостью

$$J = (N_T + N_M) F_a, \quad (2)$$

где  $N_T$ ,  $N_M$  – число активных центров на единицу площади контакта, соответственно при термическом и механическом активировании.

$N_T$  определяли по формуле

$$N_T = \nu \cdot T \cdot e^{-Q_t/K\theta}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – частота собственных колебаний валентных атомов;  $T$  – время;  $Q_t$  – энергия термической активации;  $K$  – постоянная Больцмана;  $\theta$  – абсолютная температура.  $N_M$  определяли при использовании следующей формулы:

$$N_M = \rho_t \cdot S \cdot b \quad (4)$$

Особенности формирования НМКП из БВТС были связаны с низкой теплопроводностью и относительно невысокой теплоёмкостью в сравнении со стандартными вольфрамосодержащими твёрдыми сплавами. В этой связи ионную очистку (бомбардировку) и термоактивацию (ионами) СМП из БВТС проводили при импульсной подаче напряжения смещения  $U_c$ , что позволяло производить термоактивацию при относительно медленном нагреве субстрата без риска формирования термотрещин в поверхности СМП. Температура термоактивации составляла 600-650 °C.

## 2.1. Методика формирования покрытий

Процесс осаждения НМКП осуществляли при оптимальном сочетании основных параметров процесса ФКВДО на вакуумно-дуговой установке ВИТ-2 [12]. Обеспечивали также оптимальное значение частот вращения рабочего стола установки (до 1,0-10 об/мин) и частот вращения технологической оснастки с СМП, что позволяло осуществлять равномерное формирование наноразмерных толщин субслоев износостойкого, промежуточного и адгезионного слоёв, а также нанодисперсной структуры НМКП.

Анализ условий получения НМКП при использовании процессов ФКВДО во взаимосвязи с их параметрами и свойствами позволил установить, что содержание азота в нитриде тугоплавкого соединения и соотношение «азот-металл» в формируемых слоях НМКП определяется давлением реакционного газа (азота)  $p_N$ , энергией ионов  $W_i$ . Последняя сильно зависит от напряжения смещения на субстрате  $U_c$  и тока дуги  $I_d$  при испарении катода (Ti, Zr, Cr, Al и др.). Поэтому параметры процесса синтеза адгезионного (3), промежуточного (2) и износостойкого (1) слоёв НМКП оказывают сильное влияние на их структуру, фазовый состав, параметр кристаллической решётки, структурные и геометрические дефекты, эксплуатационные свойства НМКП в целом.

Для проведения исследований были выбраны четыре типа многослойно-композиционных покрытий: Ti-TiN-(TiAl)N; Zr-ZrN-(ZrCrAl)N, Ti-(TiAl)N-(TiCrAlSi)N и Ti-TiAlN-(TiZrAlSi)N. После размещения твердосплавных СМП в камере установки проводили вакуумизацию камеры до давления 0,01 Па. Плазменную очистку рабочих поверхностей СМП проводили ионами Ag при увеличении давления от 1,5 до 2,5 Па. Затем

осуществляли окончательную очистку и термоактивацию СМП в несамостоятельном газовом разряде (ГР) при давлении 0,5 Па и максимальном напряжении смещения 1 кВт.

Режимы нанесения покрытия  $I_{Ti} = 80$  А;  $I_{Cr} = 70$  А;  $I_{Al} = 160$  А;  $U_C = 160$  В;  $p_N = 0,5$  Па.

Исследовали следующие характеристики получаемых покрытий: толщину (метод “Calotest”, прибор Fischer Sindelfingen), адгезионную прочность по отношению к материалу субстрата (метод “Scratchtest”, прибор Csem Revetest), нанотвердость и модуль  $E_1$  (метод NanoTest, прибор Micromaterials Ltd.Wrexham). Исследования на наноиндентометре проводили с использованием индентора Berkovich по стандартной методике. Для каждого образца из твердого сплава с полученным покрытием исследование нанотвердости проводили при 25 измерениях на площади  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>.

Предварительные аттестационные испытания инструмента с СМП из КНТ-16 с несколькими вариантами наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий показали, что более высокие результаты по стойкости были получены для покрытия Ti-(TiAl)N-(TiCrAlSi)N, поэтому основные исследования функциональных параметров резания были проведены при использовании инструмента с этим покрытием.

Используемое при проведении экспериментальных исследований покрытие Ti-(TiAl)N-(TiCrAlSi)N имело следующие значения основных параметров: микротвёрдость  $HV_{0,05} = 3,2$  ГПа; прочность адгезии с субстратом –  $P_{кр} = 120$  Н; общая толщина покрытия 3,9 мкм; размеры зёрен всех компонентов покрытия 10-12 нм; толщина субслоёв (наружного и промежуточного слоёв) 20-25 нм. Дальнейшие исследования проводили только для СМП из КНТ-16 с разработанными НМКП, формируемыми при использовании технологии ФКВДО.

Результаты металлографических исследований микроструктуры покрытий на поперечном шлифе при увеличении X50000 представлены на рис. 1-4.

Стоит обратить внимание на тот факт, что в процессе осаждения покрытия необходимо постоянно поддерживать достаточную температуру субстрата, что особенно важно при переходе от одного функционального слоя к другому. В частности, при переходе от промежуточного слоя к наружному износостойкому слою, производится дополнительная активация поверхности потоком металлической плазмы, что приводит к формированию дополнительного промежуточного слоя толщиной 10-30 нм, особенно хорошо заметного на рис. 1 и 2.

Промежуточный и наружный слои имеют чётко выраженную наноструктуру с толщиной нанослоев 10-15 нм. В то же время, адгезионный слой имеет такую структуру только в случае, когда он формируется хромом (рис. 3) в случае титана и циркония выраженная наноструктура отсутствует.

## **2.2. Методика исследования режущих свойств инструмента из БВТС с покрытием**

При проведении исследований использовали режущий инструмент с механическим креплением СМП из БВТС КНТ-16 (P10-P20 ISO) квадратной формы, с размерами 12,7×12,7×4,75 мм (SNUN — ISO 03111 0363; ГОСТ 19042-80). Используемые инструменты имели следующие значения геометрических параметров режущей части:  $\gamma = -8^\circ$ ;  $\alpha_s = 6^\circ$ ;  $\phi = \phi_1 = 45^\circ$ ;  $\lambda = 0$ ;  $r = 0,8$  мм.

В качестве обрабатываемого материала использовали стали 45, ХВГ, а также жаропрочный сплав на основе хрома – Х65НВФТ (область применения S05-S10 ISO).

Режущие свойства инструмента исследовали на универсальном токарном станке 16К20 с тиристорным приводом, обеспечивающим бесступенчатое регулирование частоты вращения шпинделя станка и, таким образом, поддержание заданной скорости резания при различных диаметрах заготовки.

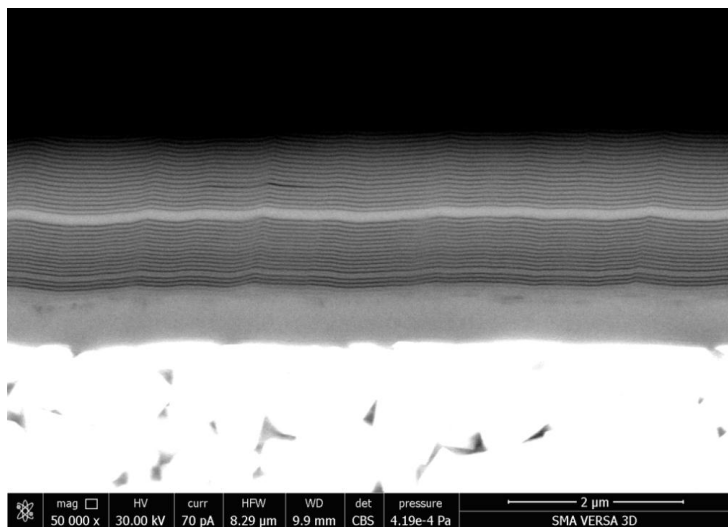


Рисунок 1 – Микрофотография структуры НМКП Zr-ZrN-ZrCrAlN (увеличение X 50000)



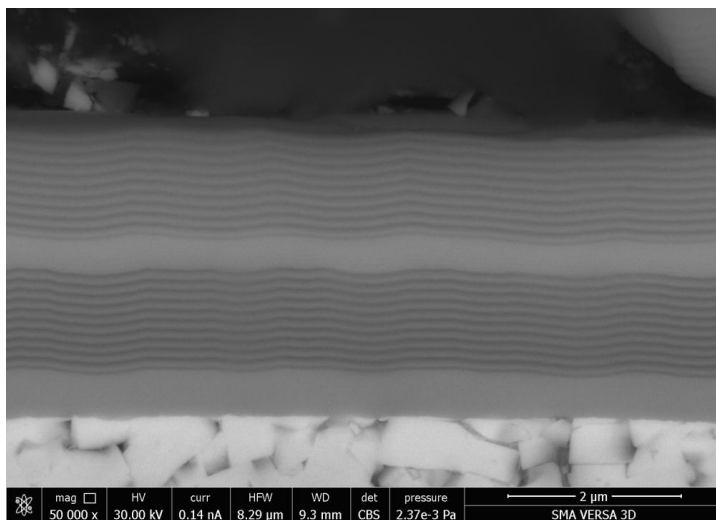


Рисунок 2 – Микрофотография структуры НМКП Ti-TiAlN-TiZrAlSiN (увеличение X 50000)

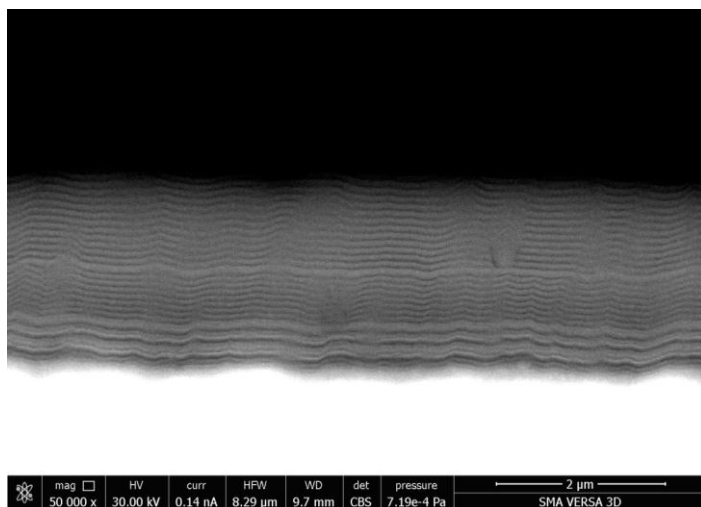


Рисунок 3 – Микрофотография структуры НМКП Cr-CrAlN-TiCrAlSiN (увеличение X 50000)

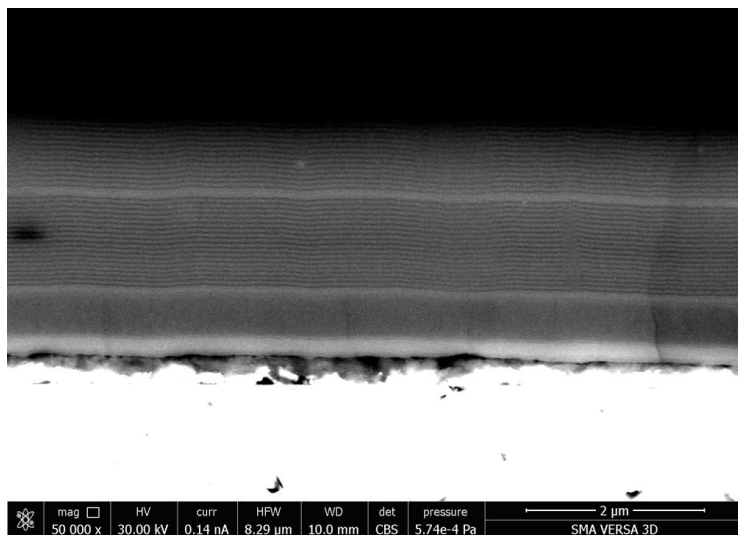


Рисунок 4 – Микрофотография структуры НМКП Ti-TiN-TiAlN (увеличение X 50000)

Параметры режимов резания:

- получистовая обработка сталей:  $t = 1,0$  мм,  $s = 0,3$  мм/об,  $v = 250-350$  м/;
- получистовая обработка жаропрочного сплава:  $t = 1,0$  мм,  $s = 0,1$  мм/об,  $v = 20-40$  м/мин.

Критерием отказа инструмента служила величина фаски изнашивания задней поверхности  $h_3 = 0,3-0,35$  мм. Измерение износа  $h_3$  проводили на инструментальном микроскопе МБС-10.

### 2.3. Результаты исследований, обсуждение

Результаты исследований функциональных параметров резания и контактных характеристик процесса сухого (свободного) точения закалённой стали ХВГ (58–60 HRC) инструментом, оснащённым СМП из БВТС КНТ-16 без покрытия и с НМКП различного состава представлены в табл. 2 и 3 и на рис. 5.

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что разработанные покрытия (НМКП), осаждаемые на контактные площадки инструмента, способствуют некоторому росту трения на границах контакта «покрытие-обрабатываемый материал», что, в свою очередь способствует, увеличению длины полного контакта стружки с передней поверхностью инструмента  $C_{\gamma}$ . Это приводит к снижению контактных напряжений  $\sigma_n$  и  $\tau_{\gamma}$  (см. рис. 6), а в

сочетании с улучшением теплоотвода одновременно снижаются и удельные термомеханические нагрузки на режущую кромку инструмента, что позволяет прогнозировать рост его износостойкости.

Таблица 2 – Контактные характеристики инструмента из БВТС КНТ-16 с покрытием

Инструментальный материал	Функциональные параметры резания						
	$C_\gamma$ , мм	$\Phi$ , град	$\mu_\gamma$	$\zeta$	$P_z$ , Н	$P_y$ , Н	$P_x$ , Н
КНТ-16	0,114	21,6	0,294	1,906	21,018	60,409	9,194
КНТ-16– Ti-TiAlN-TiCrAlN	0,120	21,3	0,310	1,933	22,124	62,135	9,194
КНТ-16– Ti-TiAlN-Ti,AlZrNbCrN	0,120	21,6	0,294	1,906	22,124	60,409	6,129
КНТ-16– TiN-TiN/AlN-TiCrAlSiN	0,141	21,1	0,334	1,961	26,549	63,861	6,129

Обозначения:  $C_\gamma$  – длина полного контакта по передней поверхности,  $\Phi$  – угол сдвига,  $\mu_\gamma$  – коэффициент трения по передней поверхности,  $\zeta$  – усадка стружки,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  – соответственно тангенциальная, радиальная и осевая составляющие силы резания

Таблица 3 – Контактные характеристики процесса резания

Инструментальный материал	$C_\gamma$	$C_{\gamma n}$	$\tau_\Phi \cdot 10^{-5}$	$q_F \cdot 10^{-5}$	$q_N \cdot 10^{-5}$	$\sigma_{Nmax} \cdot 10^{-5}$	n
	мм		H/м <sup>2</sup>				
КНТ-16-71	0,114	0,0533	603	248,999	761,751	2103,165	1,639
КНТ-16–Ti-TiAlN-TiCrAlN	0,120	0,0542	603	243,622	739,220	2055,745	1,668
КНТ-16–Ti-(TiAl)N-TiAlZrNbCrN	0,120	0,0538	603	240,130	734,616	2028,249	1,639
КНТ-16–Ti-TiN/AlN-TiCrAlSiN	0,141	0,0538	603	207,285	624,020	1747,627	1,697

Обозначения:  $C_{\gamma n}$  – длина пластического (плотного) контакта по передней поверхности;  $\tau_\Phi$  – касательные напряжения в условной плоскости сдвига;  $q_F$  – средние касательные напряжения на передней поверхности инструмента;  $q_N$  – средние нормальные контактные напряжения на передней поверхности инструмента;  $\sigma_{Nmax}$  – максимальные нормальные контактные напряжения на передней поверхности;  $n$  – показатель

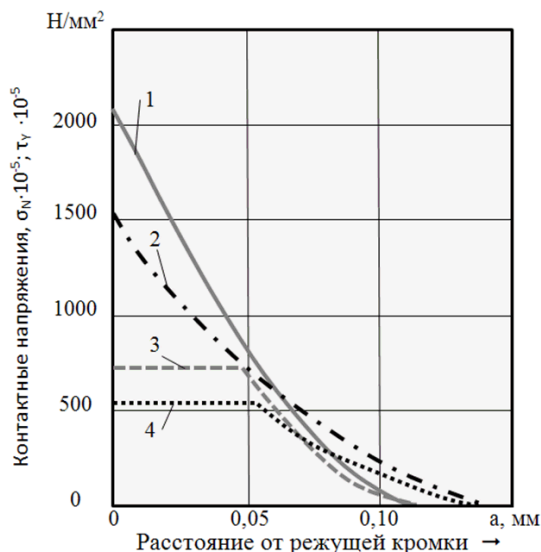


Рисунок 5 – Распределение контактных нормальных  $\sigma_n$  (1, 2) и касательных  $\tau_y$  (3, 4) напряжений на передней поверхности режущих пластин из КНТ-16 при сухой обработке стали ХВГ (58–60 HRC) с  $t=0,1$  мм;  $S=0,15$  мм;  $v=250$  м/мин ( $h$  – расстояние от режущей кромки):  
1, 3 – СМП из КНТ-16 без покрытия;  
2, 4 – СМП из КНТ-16 с покрытием Ti-TiN/AlN-TiCrAlSiN

*Результаты исследований режущих свойств инструмента из БВТС с покрытием при обработке сталей.* Результаты сравнительных исследований режущих свойств инструмента, оснащённого СМП из КНТ-16 с различными НМКП представлены на рис. 6.

Анализ характера кривых изнашивания инструмента в зависимости от времени резания «износ-время» позволяет отметить стандартный вид полученных зависимостей для инструмента без покрытия и с покрытием (рис. 6). Инструмент, оснащённый СМП из БВТС КНТ-16 с разработанным НМКП оптимального состава (рис. 6, кривая 4) продемонстрировал существенное уменьшение интенсивности изнашивания по сравнению с контрольным инструментом без покрытия и инструментом с НМКП неоптимального состава (рис. 6, ср. кривые 1-3 и кривую 4). Отмечается также сбалансированный характер изнашивания задней поверхности СМП из БВТС КНТ-16 с покрытием (Ti-TiAlN-TiCrAlSiN) без видимых макро- и микросколов режущей кромки. Стойкость таких пластин в 2-2,5 раза превышает стойкость инструмента из БВТС КНТ-16 без покрытия.

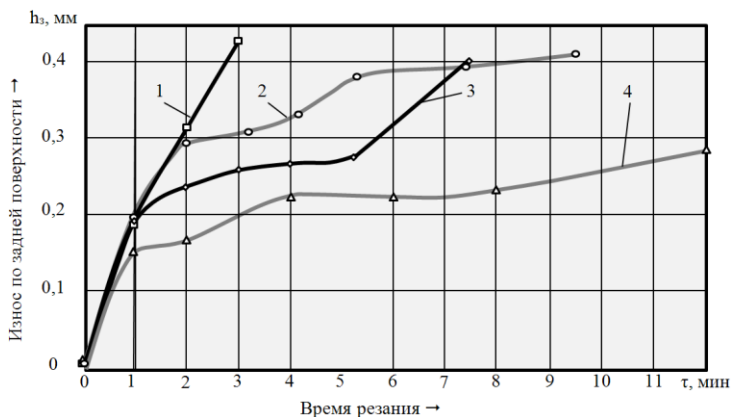


Рисунок 6 – Зависимость износа задней поверхности  $h_3$  от времени резания для СМП из КНТ-16 с различными вариантами НМКП при обработке стали 45:  
 1 – контрольные СМП из КНТ-16; 2 – КНТ-16 -(Ti-TiAlN-TiCrAlN);  
 3 – КНТ-16- (Ti-TiAlN-Ti,Al,Zr,Nb,Cr)N; 4 – КНТ-16- Ti-TiN/AlN-TiCrAlSiN

Результаты исследований режущих свойств инструмента из БВТС с покрытием при обработке жаропрочного сплава (область применения S05-S10). В качестве объекта исследования режущих свойств инструмента из БВТС с разработанными НМКП был выбран жаропрочный сплав на основе хрома Х65НВФТ, который был разработан специально для использования в авиакосмическом двигателестроении.

Х65НВФТ является тугоплавким сплавом, обладающим одновременно жаропрочностью и жаростойкостью. Жаростойкость достигается за счёт образования на поверхности при взаимодействии с окислительной средой плотных оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Сплавы на основе хрома также устойчивы против газовой коррозии в продуктах сгорания топлива, содержащего серу и существенно дешевле традиционных никелевых сплавов. Вместе с тем, в настоящее время практически полностью отсутствуют данные о технологических свойствах сплавов и, в частности, об обрабатываемости резанием - одной из важнейших технологических характеристик.

Характер изменения зависимости  $h_3=f(\tau)$ , представленный на рис. 7, свидетельствует о повышении режущих свойств СМП с НМКП на основе Ti-TiN/AlN-TiCrAlSiN. При этом установлено, что повышение стойкости инструмента, оснащённого пластинами СМП из КНТ-16 с разработанным НМКП на основе Ti-TiN-TiCrAlN по сравнению со стойкостью контрольного инструмента из КНТ-16.

Аттестационные исследования режущих свойств инструмента, оснащённого СМП из КНТ-16, осуществляли при точении жаропрочного сплава на основе хрома – Х65НВФТ со скоростями резания 20, 30 и 40 м/мин. Полученные результаты свидетельствуют о заметных преимуществах разработанных НМКП на основе систем Ti-TiN-(TiZrCr)N (рис. 7, кривая 2), Ti-TiN-(TiAlZrCr)N (см. рис. 7, кривая 3) и Ti-TiN-(TiCrAlSi)N (см. рис. 6, кривая 4). СМП из КНТ-16 с разработанным НМКП в 2-3 раза превосходили по стойкости СМП из КНТ-16 без покрытия.

Установлено отсутствие экстремума кривых функции  $T = f(v)$  для исследуемого диапазона скорости резания, осуществляемого как для СМП из КНТ-16 без покрытия, так и для инструментов с разработанными НМКП, что подтверждает принятую выше гипотезу о преобладающем влиянии адгезионно-усталостных процессов на изнашивание инструмента из БВТС с НМКП и стабильности термомеханических напряжений в зоне контактирования покрытий (НМКП) и сплава Х65НВФТ для исследованного диапазона скоростей резания ( $v = 20-40$  м/мин).

Установлено, что для процесса резания инструментом, оснащённым СМП из БВТС с НМКП, снижается вероятность внезапных отказов инструмента, связанных с микровыкрашиванием и скалыванием локальных объёмов режущей кромки, что положительно влияет на изнашивание инструмента и формирует высококачественную обработанную поверхность деталей.

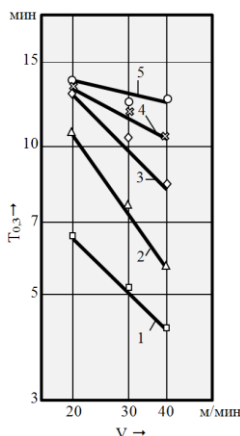


Рисунок 7 – Влияние скорости резания на стойкость инструмента, оснащённого пластинами КНТ-16 с различными НМКП при точении жаропрочного сплава на основе хрома (Х65НВФТ),  
 $t = 1,0$  мм;  $s = 0,1$  мм/об:

- 1 – КНТ-16; 2- КНТ-16-Ti-TiN-(TiZrCr)N;  
 3 - КНТ-16-Ti-TiN-(TiAlZrCr)N; 4 - КНТ-16-Ti-TiN-(TiCrAlSi)N

НМКП на основе  $\text{Ti-TiN/AlN-(TiCrAlSi)N}$  особенно эффективно при обработке сплава Х65НВФТ. Показано, что в этом случае инструменты из КНТ-16- $\text{Ti-TiN/AlN-(TiCrAlSi)N}$  имеют наименьшую интенсивность изнашивания при увеличении скорости резания.

Необходимо отметить установленный факт, что разработанная система  $\text{Ti-TiN-(TiAlZrCr)N}$ , нанесённая на СМП из КНТ-16 при использовании процесса ФКВДО, обеспечивала повышения стойкости до 2-3 раз по сравнению со стойкостью инструмента без покрытия при обработке сплава Х65НВФТ, в то время как это же НМКП при обработке Стали 45 не имело преимуществ по отношению к инструменту без покрытия во всем диапазоне изменения условий резания. Это позволяет полагать, что в настоящее время не существует универсально функционирующих покрытий для режущих инструментов и для каждого конкретного варианта резания необходимо разрабатывать покрытия со специальной структурой, составом и архитектурой.

### **Заключение**

Разработана методика рационального выбора функций и компонентных параметров архитектуры многослойно-композиционных нанодисперсных покрытий, формируемых при использовании процессов фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения для инструментов из безвольфрамовых твёрдых сплавов, позволившая существенно повысить режущие свойства такого инструмента при резании конструкционных сталей и жаропрочных сплавов.

Проведённые исследования подтвердили возможность повышения режущих свойств инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов путём управления контактными процессами при использовании наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий оптимального состава и свойств, при чистовой и получистовой обработке сталей и труднообрабатываемых сплавов на хромовой основе, что свидетельствует о возможности расширения области технологического применения инструмента из БВТС.

При продольном точении стали ХВГ с твёрдостью 58-60 HRC режущий инструмент, оснащённый пластинами из КНТ-16 с разработанным НМКП  $\text{Ti-TiN/AlN-(TiCrAlSi)N}$  оптимального состава, обеспечивает повышение эффективности обработки резанием (увеличивает площадь съёма металла с поверхности заготовки) до 2-2,5 раз по сравнению с подобным инструментом без покрытия.

Показано, что инструмент из БВТС хуже сопротивляется «вырыву» карбидных зёрен из связки сплава, чем их изнашиванию, а известный «провал» прочности связки в БВТС при увеличении температуры при резании

может являться одной из причин перехода к интенсивному изнашиванию, при этом сглаженные карбиды или карбонитриды титана, крайне неравномерно распределённые по поверхности изнашивания, дополнительно снижают сопротивление изнашиванию. В этой связи нанесение многослойно-композиционных наноструктурированных покрытий, снижающих склонность к адгезии и мощность фрикционных источников тепла, в значительной степени нивелирует органические недостатки стандартных БВТС и позволяет повысить их износостойкость.

**Список литературы:** 1. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями.- Машиностроение, 1993. -336 с. 2. *Jaworska, L., et al.*, Functionally graded cermets. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 17 Iss. 1-2 (2006), 73-76 3. *Ning, Liu, Yu-dong, Xu, Hua, Li, et al.* Effects of addition of TiN nanoparticles on microstructure and mechanical properties of TiC based cermets [J]. *Mater Sci Technol*, Vol. 18(5), (2002),586-590. 4. *Prengela, H.G., et al.* Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools. [Surface and Coatings Technology](#). Vol. 94–95, (1997), 597–602. 5. *Rahmana, M., et al.* Effectiveness of various coatings on cermet cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 58, Iss.4, (1996), 368–373. 6. *Tönshoff, H.K., et al.*, Effects of surface properties on coating adhesion and wear behaviour of PACVD-coated cermets in interrupted cutting. [Surface and Coatings Technology](#). Vol. 97, Iss.1–3, (1997), 224–231. 7. *König, W., Fritsch, R.*, Physically vapor deposited coatings on cermets: performance and wear phenomena in interrupted cutting. [Surface and Coatings Technology](#). Vol. 68–69, (1994), 747–754. 8. *Dobrzański, L.A., Golombek, K.*, Structure and properties of the cutting tools made from cemented carbides and cermets with the TiN + mono-, gradient- or multi(Ti, Al, Si)N + TiN nanocrystalline coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 164–165, (2005), 805–815. 9. *Xiao Chen, Jianfeng Xu, Qiming Xiao*. Cutting performance and wear characteristics of Ti(C,N)-based cermet tool in machining hardened steel. [International Journal of Refractory Metals and Hard Materials](#). Vol. 52, (2015), 143–150. 10. *Vereshchaka, A.A. et al., I. S.*, Development and research of nano-structured multi-layered composite coatings for tool made of tungsten-free carbides (cermets). *Applied Mechanics and Materials* Vols. 457-458 (2014) pp 120-126. 11. *Vereshchaka Alexey*. Improvement of working efficiency of cutting tools by modifying its surface properties by application of wear-resistant complexes. *Advanced Materials Research* Vol. 712-715 (2013), pp 347-351. 12. *Vereshchaka, A.A., et al.* Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools; *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72, Iss. 1 (2014), P. 303-317. 13. *Anatoly S. Vereshchaka, Alexey A. Vereshchaka and Mars Sh. Migranov*. The study wear resistance of the modified surface of the cutting tool. *Applied Mechanics and Materials* Vols. 548-549 (2014) pp 417-421. 14. *Vereshchaka, A.A., et al.*, Nano-scale multilayered composite coatings for cutting tools operating under heavy cutting conditions. *Procedia CIRP*. Vol. 14, (2014) 239–244. 15. *Vereshchaka, A.S., Vereshchaka, A.A., Kirillov, A.K.*, Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. *Key Engineering Materials* Vol.496. (2011) 67-74.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vereshchaka A.S. Rabotosposobnost' rezhushhego instrumenta s iznosostojkimi pokrytijami.- Mashinostroenie, 1993. -336 s. 2. Jaworska, L., et al., Functionally graded cermets. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 17 Iss. 1-2 (2006), 73-76 3. Ning, Liu, Yu-dong, Xu, Hua, Li, et al. Effects of addition of TiN nanoparticles on microstructure and mechanical properties of TiC based cermets [J]. *Mater Sci Technol*, Vol. 18(5), (2002),586-590. 4. Prengela, H.G., et al. Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools. [Surface and Coatings Technology](#). Vol. 94–95, (1997), 597–602. 5. Rahmana, M., et al.. Effectiveness of various coatings on cermet cutting tools. [Journal of Materials Processing Technology](#).



Vol. 58, Iss.4, (1996), 368–373. 6 Tönshoff, H.K., et al., Effects of surface properties on coating adhesion and wear behaviour of PACVD-coated cermets in interrupted cutting. Surface and Coatings Technology. Vol. 97, Iss.1–3, (1997), 224–231. 7 König, W., Fritsch, R., Physically vapor deposited coatings on cermets: performance and wear phenomena in interrupted cutting. Surface and Coatings Technology. Vol. 68–69, (1994), 747–754. 8 Dobrzański, L.A., Gołombek, K., Structure and properties of the cutting tools made from cemented carbides and cermets with the TiN + mono-, gradient- or multi(Ti, Al, Si)N + TiN nanocrystalline coatings. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 164–165, (2005), 805–815. 9 Xiao Chen, Jianfeng Xu, , Qiming Xiao. Cutting performance and wear characteristics of Ti(C,N)-based cermet tool in machining hardened steel. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Vol. 52, (2015), 143–150. 10 Vereschaka, A.A. et al., I. S., Development and research of nano-structured multi-layered composite coatings for tool made of tungsten-free carbides (cermets). Applied Mechanics and Materials Vols. 457-458 (2014) pp 120-126. 11 Vereschaka Alexey. Improvement of working efficiency of cutting tools by modifying its surface properties by application of wear-resistant complexes. Advanced Materials Research Vol. 712-715 (2013), pp 347-351. 12 Vereshchaka, A.A., et al.. Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools; International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, Iss. 1 (2014), P. 303-317. 13 Anatoly S. Vereschaka, Alexey A. Vereschaka and Mars Sh. Migranov. The study wear resistance of the modified surface of the cutting tool. Applied Mechanics and Materials Vols. 548-549 (2014) pp 417-421. 14 Vereschaka, A.A., et al., Nano-scale multilayered composite coatings for cutting tools operating under heavy cutting conditions. Procedia CIRP. Vol. 14, (2014) 239–244. 15 Vereshchaka, A.S., Vereschaka, A.A., Kirillov, A.K., Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. Key Engineering Materials Vol.496. (2011) 67-74.

*Поступила в редакцию 6.08.2015*